7 Psychoakustik

Die Psychoakustik untersucht die Zusammenhänge zwischen den auf das Gehör des Menschen einwirkenden akustischen Reizen und den daraus resultierenden Empfindungen. Das Problem liegt in der Tatsache, dass die akustischen Reize eindeutig durch objektive physikalische Größen wie Frequenz, Schalldruck, usw. zu definieren sind, während die dadurch hervorgerufenen Empfindungen nur durch mehr oder weniger subjektive Beschreibungen von Versuchspersonen zugänglich sind. Abhängig von der Hörerfahrung ist die akustische Wahrnehmung unterschiedlich differenziert. Deshalb muss bei Probandenversuchen klar zwischen dem Urteil akustischer Experten und Laien unterschieden werden. Während bei der Bearbeitung akustischer Probleme vorrangig das Expertenurteil interessant ist, sollten bei Probandenuntersuchungen zur akustischen Zielfindung immer auch akustische Laien einbezogen werden, um zu realistischen Anforderungen zu gelangen.

7.1 Das menschliche Hörorgan

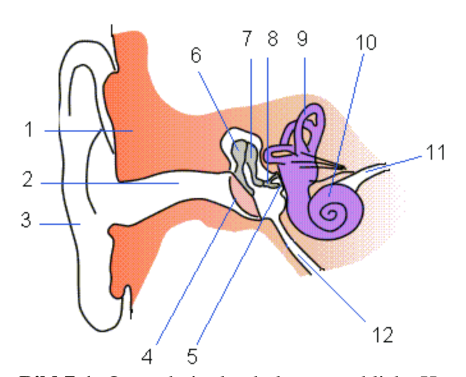


Bild 7-1: Querschnitt durch das menschliche Hörorgan

Außen-, Mittel- und Innenohr bilden das Hörorgan. Der Schall wird durch die Ohrmuschel (3) aufgefangen und im ca. 20 mm langen Gehörgang (2) zum Trommelfell (4) weitergeleitet. Während sich im Außenohr der Schall noch in der Luft ausbreitet, erfolgt im Innenohr die Leitung des Schalls in Lymphflüssigkeiten. Aufgrund der Unterschiede in der akustischen Ausbreitung der Schallwellen übernimmt das Mittelohr die Anpassung vom Außenohr zum Innenohr. Dies geschieht durch mechanische Wandlung über die Gehörknöchelchen (6, 7, 8). Dabei werden die vom Trommelfell aufgenommenen Schwingungen zum ovalen Fenster (5), dem Eingang zum Innenohr, geleitet. Die drei Knöchelchen sind beweglich gelagert und wirken wie kleine Hebel. Neben der Hebelübersetzung wirkt auch die Flächenübersetzung vom relativ großen Trommelfell zum kleinen ovalen Fenster. Auf diese Weise erfolgt eine zusätzliche Verstärkung des eintreffenden Schalls.

Der äußere Gehörgang kann näherungsweise als ein Rohr mit l = 22mm Länge und einem Durchmesser von d = 8mm betrachtet werden, durch welches eine ebene Schallwelle läuft (wegen $\lambda \gg l$). Bei schallhartem Abschluss ergibt sich die Übertragungsfunktion (Kapitel 5.7):

$$H(j\omega) = \frac{1}{\cosh\left[\left(\delta + \frac{j\omega}{c}\right)\cdot l\right]}$$

Diese besitzt eine starke Überhöhung (Gehörgangresonanz) im Bereich von ca. 4000 Hz **(Bild 7-2)**, welche sich durch ein Minimum der Hörschwelle bei dieser Frequenz bemerkbar macht (Kapitel 7.2).

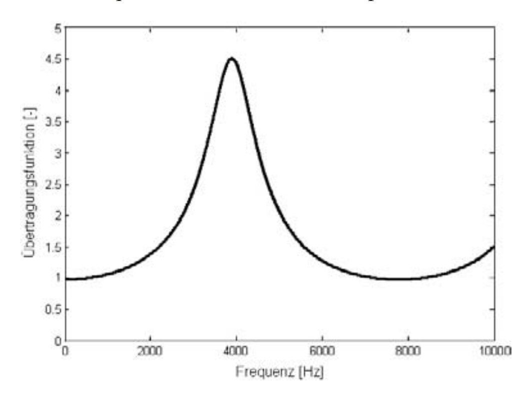


Bild 7-2: Übertragungsfunktion des Außenohrs für eine Dämpfungskonstante δ = 10

Das Innenohr ist in das Felsenbein (1), einem harten Knochen, eingelagert und mit inkompressibler Lymphflüssigkeit gefüllt. Es besteht aus der Gehörschnecke (10) mit ca. 2,5 Windungen (Cochlea) und dem Labyrinth (9), das als Gleichgewichtsorgan dient. Die Cochlea besteht aus drei parallel verlaufenden Kanälen. Der obere und untere Kanal werden von der Basilarmembran getrennt. Auf dieser Membran liegt das Cortische Organ mit den Sinneszellen des Gehörs. Die Basilarmembran schwingt in Wanderwellen. Es gibt also keine Schwingungsbäuche oder Knoten. Vielmehr wandert die Welle auf der Basilarmembran in Richtung Helicotrema, einer Verbindung vom oberen zum unteren Kanal. Auf diese Weise entsteht ein für den Hörvorgang äußerst wichtiger Effekt, nämlich die Frequenz-Orts-Transformation auf der Basilarmembran (Kapitel 7.3). Von

der Gehörschnecke geht schließlich der Gehörnerv (11) in Richtung Gehirn.

7.2 Hörbereich

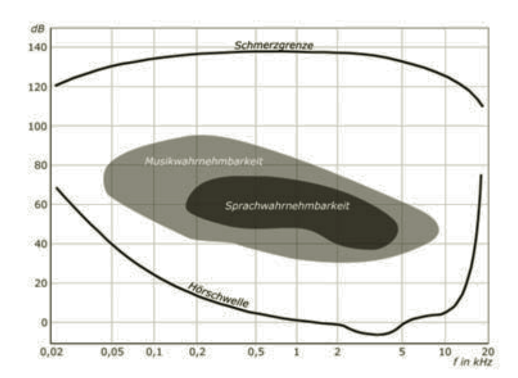


Bild 7-3: Hörbereich des menschlichen Gehörs

Für den Menschen sind Luftschallwellen nur innerhalb gewisser Frequenz- und Schalldruckbereiche wahrnehmbar. Der hörbare Frequenzbereich liegt bei normal hörenden Menschen zwischen 16 Hz und 16 kHz. Die höchste wahrnehmbare Frequenz geht mit zunehmendem Alter auf ca. 8 kHz zurück. Mehr als der Hälfte der über 60-jährigen leidet zusätzlich an einem Verlust der Hörfähigkeit im Frequenzbereich zwischen 3 kHz und 6 kHz. Dieser Sachverhalt kann u.a. erklären, warum höherfrequente Störgeräusche insbesondere von älteren Probanden sehr unterschiedlich beurteilt werden. Unterhalb von 16 Hz liegt der so genannte Infraschallbereich. Hohe Pegel in diesem Frequenzbereich sind zwar nicht hörbar, können aber zu erheblichem Unwohlsein bei empfindlichen Probanden führen. Der Frequenzbereich oberhalb 16 kHz wird Ultraschall genannt. Speziell bei jungen Probanden kann der hörbare Bereich noch einige kHz in den Ultraschallbereich hineinreichen. Der minimale Schalldruck, den das Ohr gerade noch auflösen kann, wird Hörschwelle genannt und ist stark von der Frequenz abhängig. Bei einer Frequenz von ca. 4000 Hz liegt die größte Empfindlichkeit mit einem Schwellwert des Schalldrucks von 10^{-5} N/m bzw. einem Schalldruckpegel von -3 dB. Zu tieferen und höheren Frequenzen hin nimmt die Empfindlichkeit deutlich ab. Die obere Grenze des Hörbereiches ist durch die Schmerzgrenze bestimmt. Diese ist charakterisiert durch einen Luftschalldruck von 100 N/m bei 1000 Hz, was einem Schalldruckpegel von 134 dB entspricht.

Der Bereich zwischen Hörschwelle und Schmerzgrenze wird durch Linien gleicher Lautstärke unterteilt (Isophonen). Der Wert in Phon gibt an, welchen Schalldruckpegel in dB ein Sinuston mit einer Frequenz von 1000 Hz besitzt, der gleich laut wie das zu bewertende Schallereignis empfunden wird.

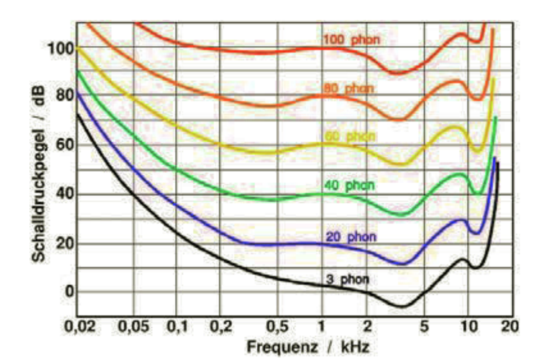


Bild 7-4: Kurven gleicher Lautstärke

Zur näherungsweisen Nachbildung der Tatsache, dass unterschiedliche Tonhöhen bei gleichem Schalldruck unterschiedlich laut wahrgenommen werden, sind in Schallpegelmessern Bewertungsfilter eingebaut, welche die Geräusche in den verschiedenen Frequenzbändern einer Dämpfung unterziehen, die in etwa dem Kehrwert der Kurven gleicher Lautstärke entsprechen [1]. Dabei entspricht die A-Bewertung dem Verlauf der Isophonen bei niedriger Lautstärke (20–40 Phon), während die C-Bewertung hohe Lautstärken annähert (80–90 Phon). Die D-Bewertung ist speziell an die subjektiv empfundene Lästigkeit angepasst. Die so frequenzbewerteten Schallruckpegel werden in dB(A) bis dB(D) angegeben. In der Fahrzeugakustik wird überwiegend nur mit der A-Bewertung gearbeitet, da alle Bewertungsfilter bei komplexen Geräuschen nur eine sehr grobe Näherung an das subjektive Empfinden darstellen (Kapitel 7.3). Der Amplitudengang eines Filters für den A-bewerteten Schallduck ist nach EN60651 z.B. wie folgt festgelegt:

$$|H| = \left|\frac{7{,}397\cdot 10^{9}\cdot s^{4}}{(s+129{,}4)^{2}\cdot(s+676{,}7)\cdot(s+4636)\cdot(s+76655)^{2}}\right|$$

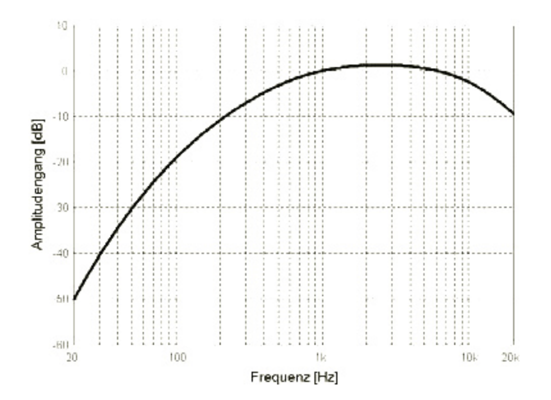


Bild 7-5: Amplitudengang des Filters zur A-Bewertung in Schallpegel-Messgeräten

Bei Anwesenheit eines zweiten Tones wird die Hörschwelle für einen bestimmten Ton angehoben (Mithörschwelle). Diesen so genannten Verdeckungseffekt kann man durch Maskierungsexperimente ausmessen, bei denen ein schmalbandiger Test-Stimulus in Gegenwart eines anderen, ebenfalls schmalbandigen Maskierers detektiert (d. h. herausgehört) werden soll. Bei systematischer Veränderung der Testton-Frequenz wird ein Maskierungsmuster erhalten, das relativ steile Flanken zu niedrigen Frequenzen hin und relativ flache Flanken zu hohen Frequenzen hin aufweist. Im **Bild 7-6** ist beispielhaft die Mithörschwelle bei Anwesenheit eines 1-kHz-Tones dargestellt. Bei einem Schallpegel von 80 dB kann z.B. ein 2-kHz-Ton von 40 dB bereits nicht mehr wahrgenommen werden (Maskierung). Das Bild zeigt auch, dass derartige Verdeckungseffekte hauptsächlich zu höheren Frequenzen hin auftreten. D.h. tiefe Frequenzen können höherfrequente Geräusche verdecken, sie sind dann subjektiv nicht mehr wahrnehmbar. Dieser Effekt spielt bei der Bestimmung der empfundenen Lautstärke von Geräuschen eine wesentliche Rolle (Kapitel 7.3). Der Verdeckungseffekt klingt nach dem Abschalten des Maskierers innerhalb von ca. 200 ms wieder ab (zeitliche Verdeckung).

In der Automobilakustik spielt die Verdeckung eine erhebliche Rolle, da das relativ niederfrequente Fahrgeräusch (Kapitel 8) zahlreiche unerwünschte höherfrequente Störgeräusche (Kapitel 13) maskieren kann. Um unhörbar zu bleiben, müssen diese daher nicht unter die absolute Hörschwelle gedrückt werden, es reicht vielmehr aus, sie unterhalb des Maskierungspegels durch das Fahrgeräusch zu legen.

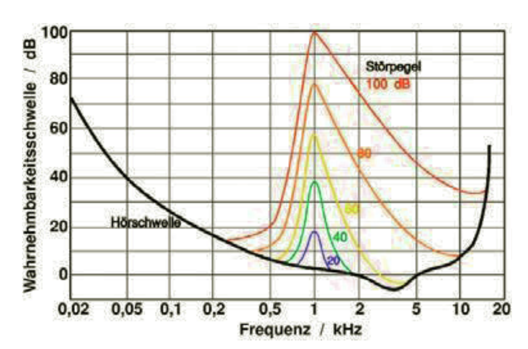


Bild 7-6: Anhebung der Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Anwesenheit eines Sinustones von 1 kHz

Im Unterschied zur Ruhehörschwelle sind differentielle Wahrnehmbarkeitsschwellen Wahrnehmbarkeitsgrenzen für die *Änderung* einer Reizgröße. Als Faustformel gilt: Amplitudenänderungen sind dann wahrnehmbar, wenn sie innerhalb einer Frequenzgruppe 1 dB (d.h. 12 % Amplitudenänderung) überschreiten. Für Frequenzänderungen liegt die Schwelle bei ca. 0.7 % für Frequenzen oberhalb von 500 Hz und bei ca. 3,6 Hz für Frequenzen unterhalb von 500 Hz. Damit ist sie abhängig von der Frequenzgruppenbreite und beträgt ca. 1 Bark. Dies bedeutet, dass das menschliche Ohr Änderungen der Frequenz im Vergleich zur Amplitude sehr viel feiner auflösen kann. Die empfundene Klangfarbe des Schalls hängt weitgehend von der Zusammensetzung des Amplitudenspektrums ab, der Phasengang spielt demgegenüber kaum eine Rolle, da das menschliche Ohr für Änderungen der Phasenbeziehungen im Frequenzspektrum des freien Schallfelds weitgehend unempfindlich ist. Nur in geschlossenen Räumen können die Phasenbeziehungen aufgrund von Interferenzerscheinungen hörbar werden (Kapitel 5.6).

7.3 Komplexe Empfindungsgrößen

Liegt kein reiner Sinuston, sondern ein Gemisch von Frequenzen vor, so spricht man entweder von komplexen Tönen bzw. von Klängen oder von Geräuschen. Musikalische oder technische Töne sind in der Regel komplexe Töne, d.h. neben der Grundfrequenz sind im Spektrum noch weitere Obertöne enthalten. Bei harmonischen komplexen Tönen sind die Obertöne ein festes ganzzahliges Vielfaches des Grundtones, die sogenannten Harmonischen. Interessant ist, dass für die subjektive Tonhöhenempfindung die Spektraltonhöhen der Harmonischen nur eine geringe Rolle spielen, während das Gehör weitere sogenannte virtuelle Tonhöhen erkennt, welche vorrangig als Subharmonische unterhalb des Grundtones angesiedelt sind [4], [5]. Klänge setzen sich wiederum aus Tönen zusammen, deren Tonhöhe in einem bestimmten ganzzahligen Verhältnis zueinander steht (z.B. Oktave 1:2). Geräusche hingegen beinhalten ein spektrales Kontinuum, ohne festen Bezug zu einem Grundton.

Art	Spektrum	Charakteristik
Sinuston	eine definierte Frequenz	synthetisch
Ton-gemisch	mehrere diskrete Frequenzen	kein festes Frequenzverhältnis
Klang	mehrere diskrete Frequenzen	ganzzahliges Frequenzverhältnis
Geräusch	kontinuierliches Spektrum	Rauschen, technische Geräusche
komplexer Ton	beliebige Frequenzen	Gemisch aus Tönen, Klängen und Geräuschen

Tabelle 7-1: Kategorisierung von Höreindrücken

Während ein Sinuston durch seine Lautheit und seine Tonhöhe bereits ausreichend charakterisiert ist, sind

bei komplexeren Höreindrücken weitere Primärwahrnehmungs-Dimensionen zu berücksichtigen. Die psychoakustische Beurteilung von Geräuschen erfordert daher neben der Lautheit die Definition einer Reihe von weiteren Empfindungsgrößen, um den subjektiven Geräuscheindruck einigermaßen vollständig zu erfassen. In **Tabelle 7-2** sind die gebräuchlichsten Empfindungsgrößen zur Charakterisierung von Geräuschen zusammengestellt.

Größe	Zeichen	Einheit
Lautheit	*N*	sone
Rauigkeit	*R*	asper
Schärfe	*S*	acum
Klanghaftigkeit	*K*	tu

Tabelle 7-2: Gebräuchliche psychoakustische Empfindungsgrößen

Die *Lautheit* ist die wichtigste Empfindungsgröße, wenn die Lästigkeit von Geräuschen beurteilt werden soll. So geht z.B. in den Annoyance-Index der Fa. AVL die Lautheit mit ca. 80% ein [7]. Die Lautheit wird in Sone gemessen. Als Vergleichswert dient ein Sinuston von 1000 Hz, dem bei 40 dB eine Lautheit von 1 Sone zugeordnet wird. Doppelte Lautheitsempfindung entspricht 2 Sone usw. Oberhalb eines Schalldruckpegels von 40 dB verdoppelt sich z.B. bei einem Sinuston von 1000 Hz die Lautheit mit jeweils 10 dB Pegelanstieg. Nach DIN 45631 kann der Zusammenhang zwischen den Empfindungsgrößen Lautstärkepegel L_N in Phon und Lautheit N in sone wie folgt hergestellt werden:

$$\frac{L_N}{Phon} = \begin{cases} 40 + 33{,}22 \cdot \lg\left(\dfrac{N}{sone}\right) & f\ddot{u}r\ \ N \geq 1 sone \\ 40 \cdot \left(\dfrac{N}{sone} + 0{,}0005\right)^{0{,}35} & f\ddot{u}r\ \ N < 1 sone \end{cases}$$

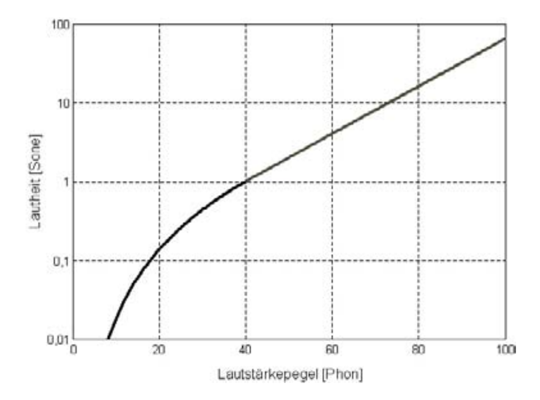


Bild 7-7: Zusammenhang zwischen Lautstärkepegel und Lautheit

Vorstehende Beziehung ist jedoch nicht allgemein gültig für den Zusammenhang zwischen der Reizgröße Schalldruckpegel (ohne und mit Bewertungsfilter) und der Empfindungsgröße Lautheit. Während die Bewertungskurven nach **Bild 7-5** nur den Schalldruckpegel und die Frequenz berücksichtigen, werden bei der Bestimmung der Lautheit nach DIN 45631 bzw. ISO 532 B insbesondere auch die Einflüsse der Frequenzgruppen sowie Verdeckungseffekte entsprechend dem Modell von Zwicker erfasst [2]. Damit wird die Lautstärkeempfindung des Gehörs auch für breitbandige und fluktuierende Geräusche hörphysiologisch richtig wiedergegeben. Wie Zwicker in umfangreichen Hörtests gezeigt hat, erfolgt die Bildung des Lautstärkeeindrucks im Innenohr in 24 Frequenzgruppen (0–24 Bark), die unterhalb von 500 Hz konstante Bandbreite von ca. 100 Hz aufweisen, während sie oberhalb von 500 Hz näherungsweise die Breite einer Terz besitzen. Daher werden in der Akustik vielfach Terzspektren aufgenommen. Aus diesen kann die spezifische Lautheit n' jeder Frequenzgruppe und daraus durch Integration über die Tonhöhenempfindung (Tonheit) z die Gesamtlautheit errechnet werden.

$$N = \int_0^{24\,Bark} n'(z)dz$$

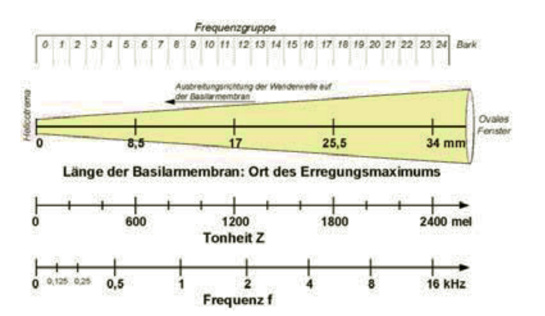


Bild 7-8: Zusammenhang zwischen Frequenzgruppen, Tonheit und Ort der Erregung auf der Basilarmembran des Innenohrs

Bei der Berechnung der spezifischen Lautheit muss darüberhinaus berücksichtigt werden, dass eine schmalbandige Anregung in einer Frequenzgruppe auch Auswirkungen auf den Höreindruck bei niedrigeren und höheren Frequenzen infolge der Anhebung der Hörschwelle hat. Aufgrund dieser Eigenschaften des Gehörs geht man bei der rechnerischen Ermittlung der Lautheit bei einem vorgegebenen Schall von einem Erregungspegelmuster aus, das mindestens den Maskierungsflanken benachbarter Frequenzgruppen entspricht. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass Schallkomponenten, die maskiert sind (d.h. infolge der Anwesenheit anderer Schallkomponenten nicht gehört werden können) auch nicht zum Lautheitseindruck beitragen **(Bild 7-9)**.

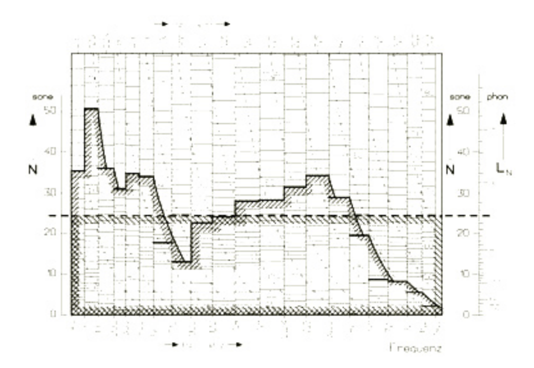


Bild 7-9: Graphische Bestimmung der Lautheit nach Zwicker

Bei der Beurteilung von Geräuschen wird im Rahmen der Automobilentwicklung in der Regel nur der A-bewertete Schalldruckpegel als grobe Näherung für den Lautstärkeeindruck betrachtet. Zur weitergehenden Bewertung des akustischen Komforts während der Konstantfahrt eines Fahrzeugs wird vermehrt auch die *Sprachverständlichkeit* herangezogen, welche ein Maß für den Grad der Beeinträchtigung verbaler Kommunikation durch das Fahrgeräusch darstellt. Die Sprachverständlichkeit im Fahrzeuginnenraum ist abhängig vom Signal-Rauschabstand und von den Eigenschaften des akustischen Übertragungspfades (z.B. Halligkeit, Verzerrungen, Abstand zwischen Sender und Empfänger). Allgemein gebräuchliche Verfahren zur Messung der Sprachverständlichkeit sind der Artikulationsindex (AI), welcher das Verhältnis von Störschall und Nutzschall bewertet, und der aus der Raumimpulsantwort abgeleitete Speech Transmission Index (STI) bzw. Rapid Speech Transmission Index (RASTI) zur Bewertung raumakustischer Einflüsse. Bei dem speziell für die Anwendung in Fahrzeugen entwickelten Sprachverständlichkeitsindex (SVI) werden sowohl der Signal-Rauschabstand in bestimmten Frequenzbändern als auch die Eigenschaften des akustischen Übertragungspfades berücksichtigt. Quantifiziert wird hier der prozentuale Anteil korrekt verstandener Silben oder Sätze über die Zeit oder der Drehzahl (Kapitel 5.6.3).

Periodische Schwankungen der Einhüllenden eines Geräusches im Frequenzbereich unter 20 Hz werden als *Schwankungsstärke* mit der Einheit [vacil] angegeben. Die *Rauigkeit* ist dagegen eine Empfindung, die bei Hüllkurvenfluktuationen eines Geräusches auftritt, welche im Bereich zwischen 20 Hz und 140 Hz liegen und damit nicht mehr als Lautstärkeschwankung aufgelöst werden, aber auch noch nicht als „glatt" empfunden werden. Die Rauigkeit wird in der Maßeinheit [asper] angegeben. Ein asper entspricht der Rauigkeit eines Sinustons von 1 kHz und 60 dB, der zu 100 % mit einer Frequenz von 70 Hz amplitudenmoduliert ist. Die Rauigkeit sinusförmig modulierter Geräusche steigt in weiten Bereichen quadratisch mit dem Modulationsgrad *m* an. Raue Geräusche werden normalerweise als störender empfunden als „glatte" Geräusche. Bei sportlichen Fahrzeugen ist hingegen ein gewisser Grad an Rauigkeit im Motorengeräusch erwünscht, da er den sportlichen Charakter des Fahrzeugs unterstreicht (Kapitel 8.3).

Neben den allgemeinen psychoakustischen Empfindungsgrößen für fluktuierende Geräusche werden auch automobilspezifische Bewertungsverfahren verwendet. Aufgrund des steigenden Marktanteiles von Dieselfahrzeugen kommt hier der unter dem Begriff *Dieselhaftigkeit* (auch: Dieselnageln) bekannten Geräuscheigenschaft eine zunehmende Bedeutung zu. Man versteht darunter eine durch den spezifischen innermotorischen Verbrennungsvorgang des Dieselmotors bedingte hohe Impulshaltigkeit des Signals, deren Periodizität auf der Folge der Zylinderbefeuerungen beruht. Das Dieselnageln ist im Leerlauf am stärksten ausgeprägt und gilt aufgrund der hohen Auffälligkeit in dieser Situation als besonders störend. Zur instrumentellen Bewertung der Dieselhaftigkeit können die im Zeitsignal sichtbaren Impulsspitzen bzw. deren Abstand zum Effektivwert des Signals herangezogen werden. Zum anderen hat auch die statistische Verteilung der Impulshöhen, insbesondere deren Dispersion, einen Einfluss auf die Ausgeprägtheit dieses Hörphänomens. Aufgrund der gegebenen Vielfalt von Bewertungsansätzen existiert derzeit keine einheitliche Bewertungsskala für die Dieselhaftigkeit [6].

Die *Schärfe* ist ein wesentliches Merkmal zur Beschreibung der Klangfarbe eines Geräusches. Sie ist ein Indikator der Balance zwischen tiefen und hohen Frequenzen. Je mehr hohe Frequenzen in einem Signal enthalten sind, umso schärfer wird es empfunden. Schmalbandrauschen bei 1 kHz mit einer Bandbreite von <160 Hz wird die Schärfe von 1 acum zugeordnet. Für die Berechnung der Schärfe eines Geräusches wurde von Bismarck ein Verfahren vorgeschlagen, das von Aures modifiziert wurde [3]:

$$S = c \cdot \frac{\int_0^{24\,Bark} n'(z) \cdot g(z) \cdot z \cdot dz}{\ln\left(\frac{N/sone + 20}{20}\right) / sone}$$

$$g(z) = e^{\frac{0{,}171 \cdot z}{Bark}}$$

Da das Verfahren nach Aures normalerweise stärker differenzierende Schärfewerte liefert, sollte immer die Berechnungsvorschrift mit angegeben werden.

Die *Klanghaftigkeit* hat wesentlichen Einfluss auf den Charakter eines Geräusches. Sie ist ein Maß für den Anteil von tonalen Komponenten im Spektrum. Tonale Komponenten können reine Töne oder komplexe

Töne (Klänge) sowie schmalbandiges Rauschen sein. Als Referenz für die Klanghaftigkeit wird ein reiner Sinuston mit 1 kHz und 60 dB verwendet, dessen Klanghaftigkeit zu 1 tu [Tonality Unit] gesetzt wird. Nach Aures wird die Klanghaftigkeit K aus dem Pegelüberschuss W_T der tonalen Komponenten und aus dem Verhältnis der Lautheit von schmalbandigen Geräuschanteilen N_{GR} zur Gesamtlautheit N wie folgt ermittelt:

$$K = C \cdot W_T^{0,29} \cdot \left(1 - \frac{N_{GR}}{N}\right)^{0,79}$$

$$W_T = f(\Delta z_i, f_i, \Delta L_i)$$

Bei breitbandigen Störgeräuschen gilt allgemein, dass der Schall umso lästiger empfunden wird, je mehr tonale Anteile vorhanden sind. Daher werden z.B. tieffrequente Brumm- oder Dröhngeräusche aber auch hochfrequente Pfeifgeräusche als besonders lästig empfunden. Die im Geräusch von Verbrennungsmotoren vorhandenen dominanten Motorordnungen können dagegen mit ihrer Klanghaftigkeit den Geräuschcharakter in Abhängigkeit von der jeweiligen Motorenbauart durchaus positiv prägen (Kapitel 9.2).

Die Klanghaftigkeit allein sagt somit noch nichts über die Qualität des Klangerlebnisses aus. Bei der Beurteilung der *Geräuschqualität* von Fahrzeuggeräuschen lassen sich drei Ansätze unterscheiden:

- Die Beurteilung der Lästigkeit eines Geräusches,
- das allgemeine Konzept des Wohlklangs, sowie
- die Soundgestaltung nach kontextabhängigen Erfordernissen.

In der Vergangenheit wurde in erster Linie die Lästigkeit von Geräuschen betrachtet. Deshalb wurde eine Reihe von Modellen entwickelt, welche diese Lästigkeit abbilden können. In den AVL-Annoyance Index gehen beispielsweise die psychoakustischen Parameter Lautheit, Schärfe, Rauigkeit bzw. Schwankungsstärke und Impulshaftigkeit ein, wobei die Lautheit mit 70–80 % den größten Einfluss besitzt [7].

Gute Geräuschqualität ist aber mehr als nur die Abwesenheit von störenden Geräuschanteilen. Deshalb wurden vielfältige Versuche unternommen, die psychoakustischen Beurteilungsgrößen zu einem Einzahlenwert zusammenzufassen, der ganz allgemein den *Wohlklang* eines Geräusches ausdrückt. Der sensorische Wohlklang P dient u.a. zur Bewertung von Maschinengeräuschen und wird nach [8] ebenfalls aus den Empfindungsgrößen Rauigkeit, Schärfe, Klanghaftigkeit und Lautheit wie folgt bestimmt:

$$P = e^{-0,55R} \cdot e^{-0,113S} \cdot \left(1,24 - e^{-2,2K}\right) \cdot e^{-0,023N}$$

Während Rauigkeit, Schärfe und Lautheit nach dieser Definition erwartungsgemäß einen negativen Einfluss auf den Wohlklang besitzen, wirkt sich die Klanghaftigkeit positiv aus. Auch einige in der Praxis verwendete Metriken zur Bewertung von Dieselgeräuschen sind ebenfalls Abwandlungen der obigen Formel.

Beim musikalischen Wohlklang hat im Rahmen der Harmonielehre das Konzept der Konsonanz bzw. Dissonanz wesentliche Bedeutung. Für das menschliche Ohr erscheinen manche Anordnungen von Tönen entspannend und beruhigend (konsonant) während andere scharf und „strebend nach Auflösung“ (dissonant) sind. In der Hörpsychologie gibt es zahlreiche Theorien, die das Phänomen der Konsonanz und Dissonanz erklären sollen. Die älteste und bekannteste ist die bereits auf Pythagoras (6. Jh. v. Chr.) zurückgehende Proportionstheorie. Diese besagt im Kern: Je einfacher das Schwingungsverhältnis zweier Töne zueinander ist, desto konsonanter ist ihr Intervall. Die Proportionstheorie kann nicht alle Phänomene im Zusammenhang mit der Konsonanz und Dissonanz befriedigend aufklären. Jedoch auch neuere Theorien liefern nicht für alle Fälle eine befriedigende Erklärung. Grundsätzlich kann man aber annehmen, dass bei sehr nahe beieinander liegenden Frequenzen von Grund- und Obertönen, wie sie bei großen Proportionen aufteten, infolge von Interferenzen Rauigkeitseffekte auftreten, die ein unharmonisches Klangbild verursachen. Interessant ist auch, dass die Tatsache, ob ein Klang als konsonant oder dissonant empfunden wird, offensichtlich stark vom tradierten musikalischen Umfeld abhängt. So galten von der Antike bis zum Mittelalter im abendländischen Kulturkreis nur Oktave, Quinte und Quarte als konsonant, während in der klassischen Musik Klänge bis zur kleinen Sexte auch noch als konsonant angesehen wurden und in der modernen Musik sogar die kleine Septime zu dieser Kategorie gezählt wird.

Intervall	Proportion	Klang
[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	
[illegible]	[illegible]	

Tabelle 7-3: Ausgewählte Intervalle und Proportionstheorie

Folgt man der Qualitätsdefinition nach DIN 55350, so lässt sich die Geräuschqualität auch als Erfüllung der Erwartungshaltung des Rezipienten interpretieren. Damit erklärt sich auch, dass die Geräuschqualität normalerweise eine kontextabhängige Größe ist und eine allgemeingültige Definition im Sinne von „Wohlklang" in der Praxis nur eingeschränkten Erfolg verspricht. Das Fahrgeräusch eines Automobils sollte beispielsweise zum jeweiligen Fahrzeugtyp passen und dadurch den Fahrzeugcharakter positiv unterstreichen (Kapitel 8.3). Wie bereits in Kapitel 2.1.3 gezeigt, lässt sich die Qualität so komplexer Geräusche, wie sie z.B. der *Fahrzeugsound* darstellt, nicht mehr durch eine einzige psychoakustische Größe ausreichend beurteilen. Vielmehr werden in diesem Fall mindestens die vier orthogonalen Wahrnehmungsdimensionen Lautheit, Dynamik, Härte und Timbre zur ausreichenden Charakterisierung erforderlich. Während die zwei erstgenannten Dimensionen die Pegelverhältnisse des Fahrgeräusches betreffen und durch die bekannten Lautheitsmodelle beschrieben werden können, existieren für die zwei letztgenannten Dimensionen, welche den Geräuschcharakter beschreiben, bisher noch keine adäquaten psychoakustischen Modelle.

Literatur

[1] ISO/DIS 10845, Akustik – Frequenzbewertung „A" für Geräuschmessungen. Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe: 1995-06

[2] Zwicker, E. und Fastl, H.: Psychoacoustics. Facts and Models, Springer Verlag, ISBN 3-540-65063-6, 1990

[3] Aures, W., Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, Dissertation, TU München, 1984

[4] Helmholtz, H.: Die Lehre von den Tonempfindungen als Grundlage für die Theorie der Musik, Vieweg, Braunschweig, 1863

[5] Terhardt, E.: zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen, Acustica 26, 1972

[6] Patsouras, Ch.: Geräuschqualität von Fahrzeugen – Beurteilung, Gestaltung und multimodale Einflüsse, Dissertation, TU München, 2003

[7] Beidl, C. V.; Stücklschwaiger, H.: Application of the AVL Annoyance Index for Engine Noise Quality Development, Acustica/acta acustica 83, 1997

[8] Aures, W. (1985). Berechnungsverfahren für den sensorischen Wohlklang beliebiger Schallsignale. Acustica, Vol. 59, pp. 130–141

[9] Zeitler, A.: Auditory Pleasantness, Dissertation KU Eichstätt, 2002

[10] Hellbrück, J.; Ellermeier, W.: Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie, Hogrefe Verlag Göttigen, 2004